基于分形理论的陇东地区沟谷发育特征及影响因素分析

唐延东， 臧翠萍， 于云鹏， 余青霖

（四川工程职业技术大学建筑工程学院，四川 德阳 618000）

摘 要：黄土高原因其易被流水侵蚀的土壤特性，经常遭受沟谷溯源侵蚀而造成耕地面积减小并诱发地质灾害等一系列问题。基于高精度遥感影像和DEM，提取了沟谷网络及其特征参数，分析了沟谷之间的相互影响关系和发育特征。通过计算流域沟谷的盒维数和沟沿线的边界维数，对沟谷侵蚀发育的复杂程度进行了综合评价。同时，基于盒维数和边界维数，研究了沟谷流域的发育过程及其侵蚀的空间分布规律。研究发现：(1) 在发育次一级的沟谷时，沟谷顺流方向单侧有110°的可发育区间。(2) a流域的侵蚀发育程度最复杂，b次之，c最小；b流域的沟沿线最复杂，a次之，c最简单；c流域的沟谷侵蚀发育程度从SW向NE递增。(3) 地质构造是影响着沟谷发育程度的主要因素之一；高程越高，黄土厚度越薄，植被越稀少，沟谷侵蚀发育程度越高。研究结果可为陇东地区水土保持治理提供指导建议。

关 键 词：沟谷发育；遥感解译；分形理论；影响因素；陇东地区

文章编号：1000－6060(2025)02－0223－11(0223～0233)

黄土地貌一直是地学研究的热点地区，特殊的土壤性质使得黄土地区遍布纵横交错的沟谷网络和不断被蚕食的黄土塬、墚和峁地貌[1]。黄土沟谷作为黄土高原上的一种典型地貌，研究其发育和侵蚀空间分布规律能够帮助缓解黄土地区的水土流失问题，也能厘清沟谷溯源侵蚀的规律并合理规划土地资源[2]。陇东地区位于黄土高原南部，沟谷侵蚀剧烈，黄土地貌种类丰富，是研究黄土沟谷发育规律及特征的理想地区之一[3-4]。近年来，庆阳市政府开展了固沟保塬工程，这些工程在一定程度上缓解了严重的水土流失问题，但是大规模人类工程改变了原生地质环境并导致了诸多灾害发生。而黄土高原上发生的灾害几乎都是与水关联紧密。因此，对陇东地区沟谷水系发育和侵蚀规律的研究更加迫在眉睫。学者们对沟谷发育特征及其演化模式非常重视，在沟谷侵蚀产沙[5-6]、沟谷发育阶段的划分[7]、沟谷地形因子提取与分析[7-9]、沟谷演化模式[10]等方面都进行了详实的研究。李军锋等[11]对黄土沟谷地貌类型做了比较系统全面的分类；刘秉正等[12]发现沟谷侵蚀具有明显的分带性并将分水岭到沟床划分为3个带和6个亚带；何雨等[13-14]将黄土沟谷的发育分为：纹沟、细沟、切沟、冲沟和坳沟，并用长宽比来衡量沟谷的发育过程及其稳定性具有一定的定量性；王辉等[15]探讨了中国黄土丘陵沟壑区沟谷在中尺度时间上的面积和深度变化规律以及对该变化的空间差异及其重要影响因子，系统分析了沟谷中不同部位的侵蚀特性并评价了其危险性；张婷[16]还提供了应用于沟谷网络的多尺度分析模型，为类似流域的河谷、脊网等的多尺度研究提出了可供参考的分析模型，为认识和预测流域系统的总体情况如流域变迁、水文预测、流域管理等方面提出依据。前人虽然已经从侵蚀、分类等方面[10]对沟谷的发育规律进行了探索，但仍然缺乏基于统计学方法对黄土沟谷发育分布规律的研究，尤其是从沟谷走向入手统计分析沟谷与其次级沟谷的发育模式。

收稿日期：2024-04-29； **修订日期**：2024-07-30

基金项目：四川省自然科学基金(2023NSFSC0789)资助

作者简介：唐延东(1985-)，男，汉族，硕士，副教授，主要从事岩土工程和工程地质方面的研究. E-mail: tyd1201@126.com

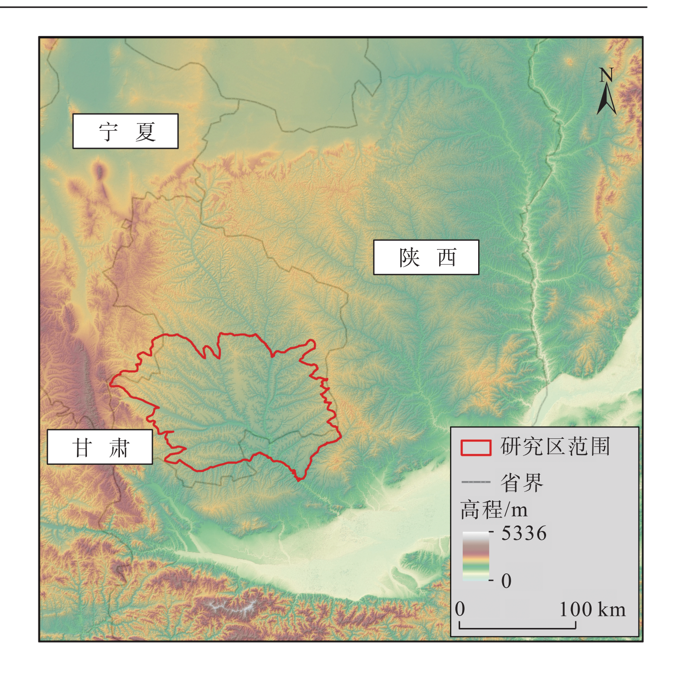
通讯作者：臧翠萍(1987-)，女，汉族，硕士，讲师，主要从事土木工程和工程管理方面的研究. E-mail: 115497513@163.com

分形理论为沟谷的发育特征和侵蚀发育的量化带来新的研究思路。由于分形理论能够有效地描述几何特征，它已被广泛应用于包括地貌学在内的各个领域。分形理论在地貌学中的一个具体应用是利用分形算法建立河网模型并模拟河网的演变过程。在地貌学领域，研究人员强调了地理信息理论和分形模型在理解地貌特征方面的重要性。沟谷网络表现出来的自相似性和分形的定义相契合。对于地貌形态的复杂性和随机性，分形理论能很好地量化沟谷网络的复杂度[17]。蔡凌雁等[18]和陶象武[19]尝试用分形理论中的盒维数对黄土地貌分形特征进行研究，发现黄土高原流域地貌呈现出自相似性和几何布局；苟娇娇等[20]则采用2个维数进行对比分析研究流域地貌；还有一些学者研究了分形维数与沟谷侵蚀[21]、流域面积[22]、流模数[20]、产沙模数[23]的关系；分形理论还被地貌学者用于分析小流域的特征，为了解地貌特征的复杂性提供了见解[24]。此外，还有学者探讨了箱式计数与地貌分形维度之间的关系，介绍了计算分形维度和分形平面树建模的方法[25]。在黄土沟谷量化参数方面，目前对于侵蚀速率、沟壑密度等方面的研究[26-27]已经十分详尽，但基于分形理论的盒维数和边界维数对沟谷网络的研究仍存在不足。

故本文基于DEM和影像数据，目视解译了陇东地区3条典型沟谷，提取了沟谷网络并进行了分级和特征参数计算；然后通过统计学分析了沟谷走向的规律并进一步探索了沟谷发育模式及沟谷间的影响关系；再基于分形维数研究沟谷流域的发育和侵蚀空间分布规律；最后，以c流域为例，探究了沟谷侵蚀发育空间分异性。

1 研究区概况

陇东地区位于甘肃省东部，地理位置介于106°20′~108°45′E与35°15′~37°10′N之间，总面积2.7×10^4 km^2（图1）。地形北高南低，海拔在885~2082 m之间。陇东黄土高原地区沟壑纵横，具有典型的塬、梁、峁及沟谷地形。地表主要由第四系风成黄土所覆盖，其主要形成于全新统。研究区的地层自上而下可分为上更新统马兰黄土、中更新统离石黄土、下更新统武城黄土、上新世泥岩和下白垩统夹泥岩砂岩。沟谷地区局部出露基岩，以新近系泥岩和陆相



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

白垩系砂岩为主。陇东地区属温带大陆性季风气候，各地年平均气温在8.7~10.1 ℃之间。通过国家气象局数据（http://data.cma.cn/en），查明研究区域年平均降水量范围是417~616 mm[28]，降雨量分布特征为东南部>中部>西北部。6—9月的降水量约占全年降水量的70%，降雨多以强度大、持续时间短的暴雨形式出现。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文基于ArcGIS 10.3软件平台，通过使用30 m分辨率的2010年ALOS DEM（https://search.asf.alaska.edu/#/）和3.88 m分辨率2010—2020年Google Earth影像数据（https://www.google.cn/earth/），目视解译陇东地区3条典型流域沟谷并进行分级和特征参数求取。ALOS DEM数据在研究区范围内具有较好的垂直精度且不存在数据空洞，通过以具有高度时空稳定性的地物特征作为控制点，实现了DEM和卫星影像数据的精确配准，从而尽量降低了解译结果中可能存在的误差。

2.2 研究方法

本文参照前人研究将沟谷水系按照所属关系

分为主沟、一级支沟、二级支沟和三级支沟[29]。然后对3个流域特征参数进行统计学分析，得出沟谷走向的统计学规律，进而研究其沟谷发育模式及沟谷间的影响关系。

沟谷网络的特征从定性的描述渐渐走向定量的描述，其中分形理论是定量描述流域地貌的一种方法。分形维数是可对复杂的、不规则的事物进行定量刻化的重要参数。同时，分形维数有许多变种，如：信息维数、盒维数、相似维数等。其中，盒维数的运用较为广泛。本文对陇东地区部分流域的盒维数和边界维数进行了估算并对比分析，其中计算盒维数主要的步骤包括：洼地填充、流向分析、流量计算、水流长度计算、生成沟谷网络、分流域提取沟谷网络和分流域计算盒维数。

为了得到某曲线的长度，将一定长度作为度量。通过该度量测量曲线，得到测量次数。测量次数乘以度量的长度即可得到曲线的近似长度。从实践中可以发现，使用不同度量得到的曲线长度不同。当度量越接近0，得到曲线长度越贴近真实的长度：

$$L = \lim_{R \to 0} N \times R \tag{1}$$

式中：L为曲线的实际长度；N为测量次数；R为度量的长度。当R等于1时，该值大多数时候不收敛，则令R的指数为D：

$$L = N \times R^{D} \tag{2}$$

经过推导可得出分形维数的计算公式[30]：

$$D = -\lim_{R \to 0} \frac{\ln N(r)}{\ln R} \tag{3}$$

式中：D为边界维数；$N(r)$为测量次数。边界维数是用来衡量斑块的粗糙性和不规则度的参数[30-31]。

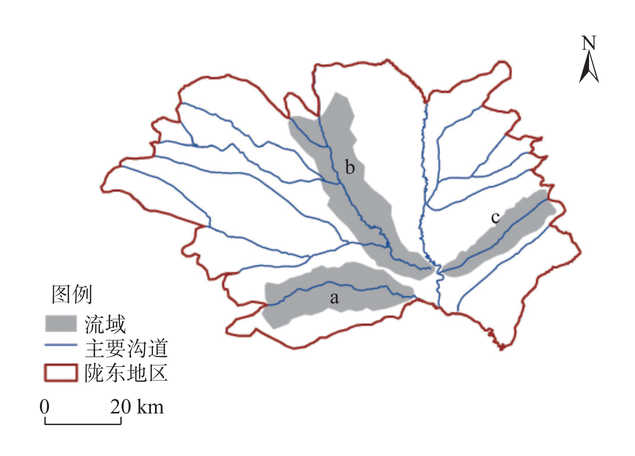
当用一定尺度的方格网去覆盖一条位于二维平面的曲线时，只有部分方格包含曲线。类似的统计方格，称为盒子。根据非空个数和盒边长长度，建立线性回归，则该直线的斜率即为盒维数。通过ArcGIS中的ArcToolbox中的Conversion Tools模块下的Polyline to Raster工具对3个研究流域的沟谷网络进行批处理。其中，字段cellsize代表转换的栅格数据中栅格的大小，也是盒维数计算中盒子的边长(S)，这里分别取1000、900、800、700、600、500、400、300、200、100、90、80、70、60、50、40、30、20、10。批处理之后所得的结果即为相关的栅格数据。打开相应的属性表，对count字段进行求和，得到覆盖沟谷网络的盒子数(N)。然后计算S和N的对数值$\lg S$和$\lg N$。利用Excel进行线性回归分析，在双对数坐标图上找一段线性关系最好的区间作为无标度区间，则这段直线拟合的斜率即为该流域网络的盒维数值。而盒维数表征更细观角度上的形状复杂性。

为了探究影响黄土地区沟谷侵蚀和发育的因素，讨论了高程、黄土厚度、地质构造、植被4个因素对沟谷发育的影响，并讨论其各个因素的影响机制，分析各个影响因素与黄土沟谷侵蚀发育之间的关系。

3　结果与分析

3.1　陇东沟谷网络分级和特征参数提取

3.1.1　陇东地区沟谷发育现状及沟谷网络分级　黄土高原陇东地区沟谷发育的空间分布与应力场相契合，陇东地区新构造主压应力方向为47°~61.5°NE[32]。一些深切的黄土沟谷在空间分布上与该地区的新构造压应力方向呈现正交关系。姜琳等[32]研究发现鄂尔多斯盆地东南部中生代地层中发育分别有E-W与N-S、ENE-WSW与NNW-SSE、WNW-ESE与NNE-SSW 6组节理并且它们构成了三期的正交节理系统。同时，这三期正交节理系统的走向与陇东地区主要沟道的走向具有一致性。现今黄土高原陇东地区主要沟道共16条(图2)，其中符合N-S与E-W正交节理组的有6条，符合NNE-SSW与NNW-SSE正交节理组的有7条，符合NNW-SSE、WNW-



注：a为泾河流域；b为蒲河流域；c为四郎河流域。下同。

图2　陇东地区沟谷分布

Fig. 2　Gully distribution of eastern Gansu Province

ESE与NNE-SSW正交节理组的有3条。本研究选取陇东地区的泾河流域(a流域)、蒲河流域(b流域)和四郎河流域(c流域)3条典型沟谷(图2)进行分析并分为主沟、一级支沟、二级支沟(图3)。a流域走向为近E-W向,发育有109条一级支沟,382条二级支沟。b流域走向约为147°,发育有161条一级支沟,621条二级支沟。c流域走向约为68°,发育有164条一级支沟,690条二级支沟。

3.1.2 沟谷网络特征参数的统计学分析 基于DEM和水系分布解译出3条典型沟谷的主沟、一级支沟及二级支沟的发育方向,并分别计算沟谷与其次级发育沟谷之间的夹角。研究发现:沟谷与其次一级沟谷的夹角大多数呈60°~90°(图4),a、b和c 3个流域分别有77.1%、64.0%和67.1%的主沟与一级支沟的夹角落在此区间,分别有76.3%、72.5%和69.7%的一级支沟与二级支沟的夹角落在此区间,这表明沟谷发育存在着客观规律。进一步探究沟谷与其次一级沟谷夹角的统计学规律发现:在80%的可置信区间下,a、b和c 3个流域的主沟与一级支沟、一级支沟与二级支沟的夹角存在统计学关联,其主沟

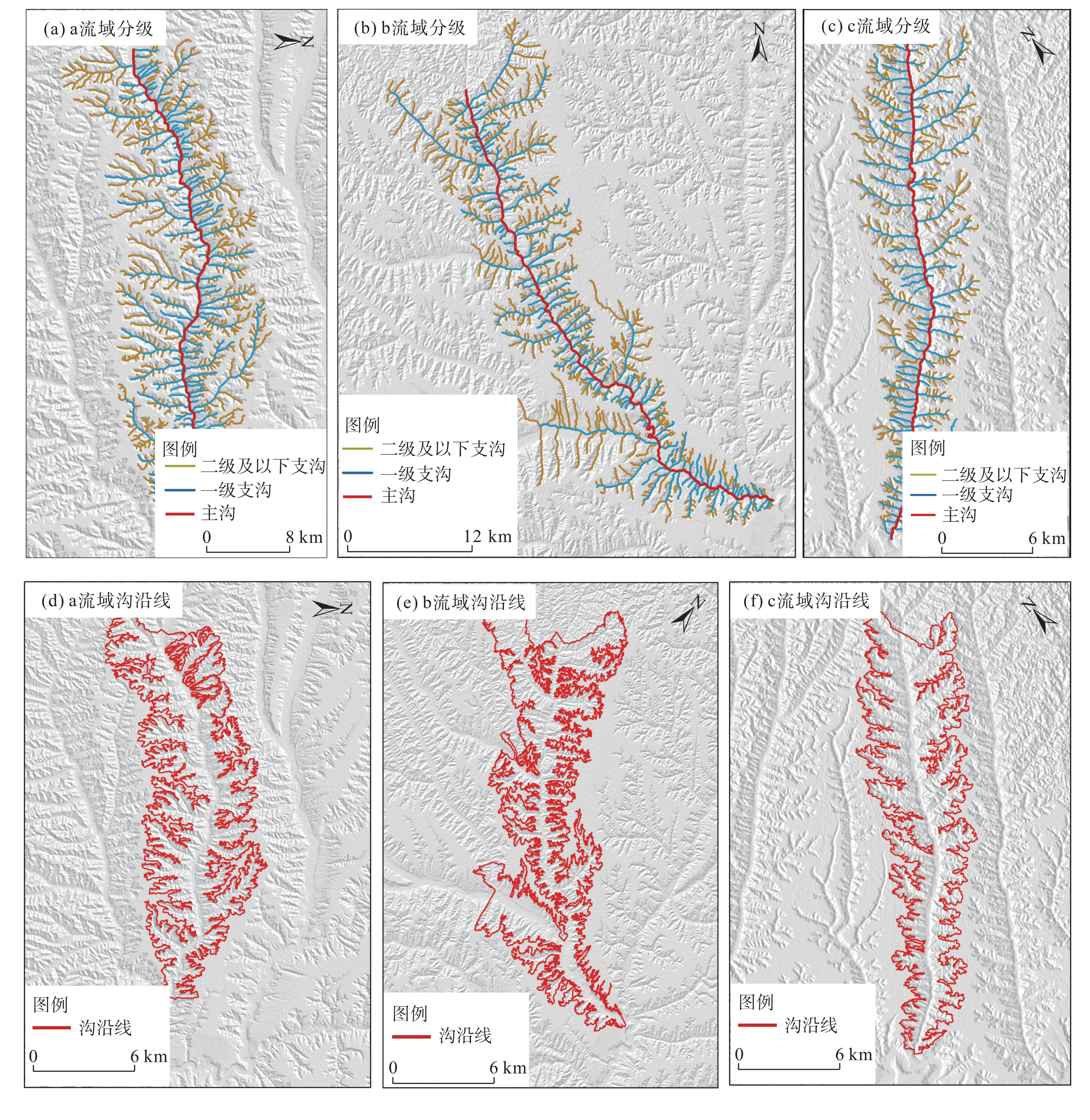


图3 3条典型流域分级及沟沿线

Fig. 3 Three typical watershed classification and gully alignment

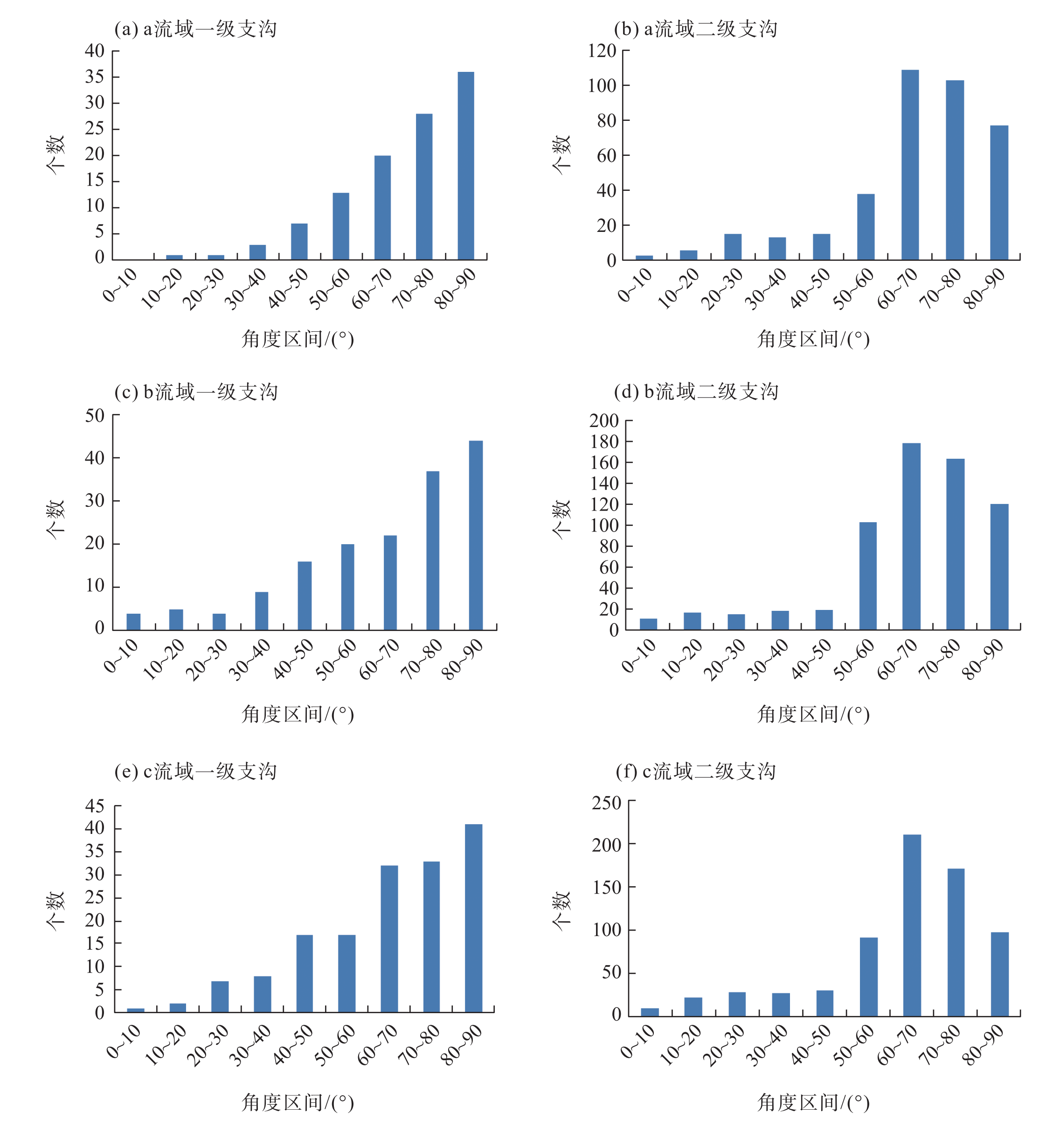


图4　沟谷与其次一级沟谷夹角统计分布

Fig. 4　Statistical distribution of the angle between the gully and its secondary gully

和一级支沟的夹角区间分别为57°~90°、50°~90°和50°~90°，其一级支沟和二级支沟的夹角区间分别为58°~90°、58°~90°和55°~90°（表1）。55°可视为沟谷发育夹角的极限值，也就是说在沟谷发育次一级的沟谷时，单侧有110°的可发育角度区间。通过与袁爽等[29]的文章相佐证，本文的统计分析结果具有较好可靠性。

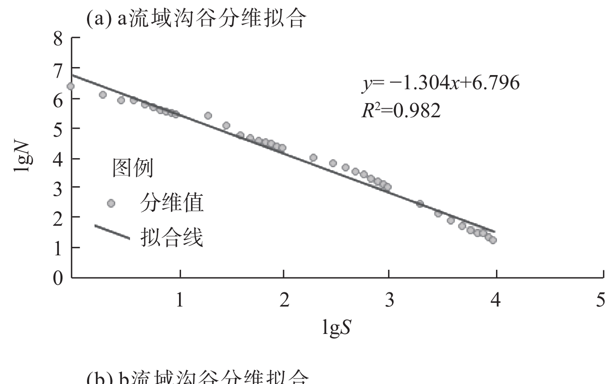
3.2　基于分形的沟谷侵蚀发育分布特征研究

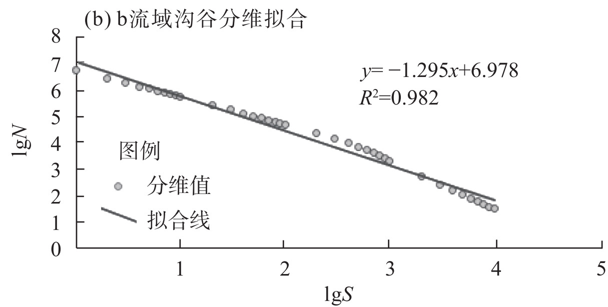
3.2.1　沟谷网络的盒维数分析　通过在ArcGIS上对栅格数据处理，得到了研究区3个流域（a、b、c）相关的盒维数计算中盒子的边长（S）和非空盒子数（N）。数据经过进一步处理分析，得到相应的lg$S$和lg$N$并计算线性回归（图5）。研究发现：a流域的盒维数为1.304，b流域的盒维数为1.295，c流域的盒维数为

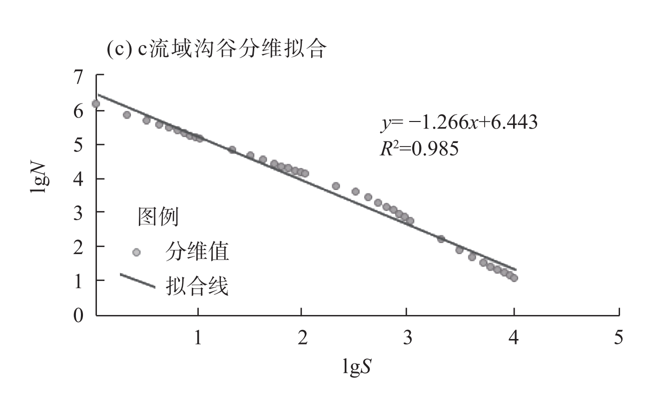
表1　80%置信度下沟谷与其次一级沟谷夹角统计表

Tab. 1　Statistical table of the angle between the gully and its secondary gully at 80% confidence level

流域	沟谷与其次一级沟谷	沟谷夹角区间(80%置信度)
a	主沟与一级支沟	57°~90°
	一级支沟与二级支沟	58°~90°
b	主沟与一级支沟	50°~90°
	一级支沟与二级支沟	58°~90°
c	主沟与一级支沟	50°~90°
	一级支沟与二级支沟	55°~90°







注:N为非空盒子数;S为盒子的边长。

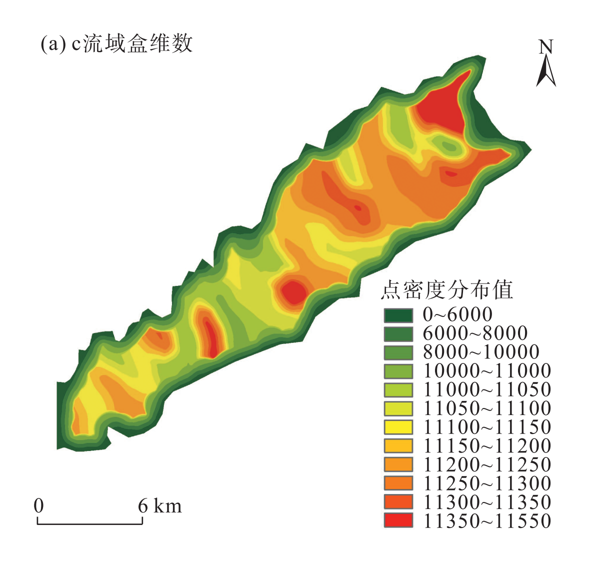
图5 流域沟谷盒维数拟合

Fig. 5 Watershed gully box dimension fit plot

1.266。a流域的侵蚀发育程度最复杂,b次之,c最小。

3.2.2 沟谷网络的分形维数分析 黄土地区地貌类型复杂多样,空间分布不均,但仍有一定的规律性。从正负地形和沟谷发育的角度出发,黄土地貌可以根据地形的海拔和基本形态分为正地形的塬、墚和峁地貌(沟间地)和负地形的沟谷。沟沿线作为这两大地貌类型的分界线具有及其重要的研究意义。本文基于高精度DEM和遥感影像,对陇东地区3条典型流域进行目视解译提取沟沿线,通过提取流域面积和周长计算流域的边界维数。结果可得:a流域的边界维数为1.771;b流域的边界维数为1.816;c流域的边界维数为1.718。边界维数的大小顺序为:b>a>c,b流域的沟沿线复杂程度最复杂,a流域次之,c流域最简单。

3.2.3 沟谷侵蚀发育空间分异分析 地貌演化的基本地质营力和人口分布的空间分异性,造成了沟谷发育也具有空间分异的特征。作为描述黄土高原受侵蚀作用强弱和沟谷复杂程度的定量指标——沟谷的盒维数和沟沿线的边界维数值,其在空间分布上也存在一定的规律性。c流域是一条SW-NE走向的流域,其主次沟发育较为完整,也没有存在其他流域主沟与其主沟相交或流域主沟生出分支的现象,故选取c流域进行盒维数和边界维数的空间分异研究。通过水文分析将c流域划分为31个小流域,具体的操作步骤见研究方法。分别计算31个小流域的盒维数(图6a)和边界维数(图6b)再进行克



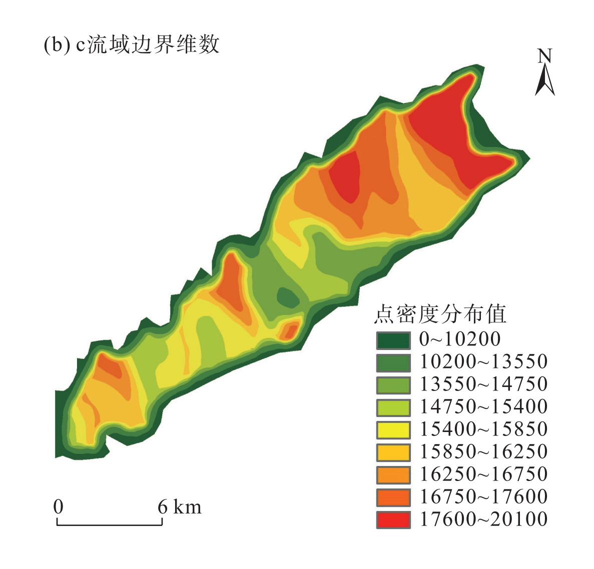


图6 c流域盒维数和边界维数点密度空间分异

Fig. 6 Spatial differentiations of point densities of box dimensions and boundary dimensions in watershed c

里金空间插值。边界维数表征自然界中具有复杂边界的粗糙度和不规则性，本文中假设其表征沟谷网络发育规模和复杂程度。研究发现：c流域的盒维数从SW向NE呈现逐渐增加的趋势。沟谷网络发育规模和复杂程度（边界维数）从SW向NE也呈现逐渐增加的趋势。这说明了无论是在相对宏观（边界维数）还是相对细观（盒维数）的分析下，c流域的沟谷发育规模和复杂程度空间分异特征是比较明显的南西低北东高。从地质意义上来分析，地貌因素是导致c流域的沟谷发育规模和复杂程度空间分异的主要原因。首先，在高程上c流域南西低北东高（图7），北东部属于上游的集水区。鉴于黄土高原溯源侵蚀作用的强烈，集水区往往会发育出更为复杂的沟谷网络。此外，黄土厚度也是一个值得考虑的因素，c流域的黄土层南西厚北东薄（图8），较薄的黄土层则更易被流水侵蚀。

3.3 沟谷侵蚀发育影响因素

3.3.1 高程 c流域的北东部高，南西部低，高程范围在887~1579 m之间，存在将近700 m的落差。在对c流域的沟谷进行盒维数和边界维数分析时可以看出：从NE到SW，c流域盒维数和边界维数大体上呈现出不断减小的趋势，这与高程的变化趋势一致（图6）。盒维数和边界维数都表征沟谷发育的复杂程度，这表明高程与沟谷的发育复杂程度呈正相关（图7）。从地质因素上考虑，一方面高程越高，其侵蚀基准面就越高，更易形成沟谷侵蚀下切，导致土壤侵蚀加剧。另一方面，c流域高程较高的北东部位于上游区域，属于集水区。而集水区往往会发育出更为复杂的沟谷网络[2]。此外，袁爽等[9]也通过讨论塬占比与高程的关系，发现塬占比随塬面平均高程的升高而减小。小的塬占比则代表大的沟谷发育程度，也就表明沟谷发育程度随塬面平均高程的升高而增大，这与本文的结论可以相互印证。考虑到c流域北部地区沟谷发育的程度，建议在该地区加大“固沟保塬”工程的实施力度，尤其应采取措施减少降雨后水集流产生的侵蚀灾害。

3.3.2 黄土厚度 鄂尔多斯盆地的各种地质构造造成了研究区黄土下伏古地形的不同分布格局，进而在黄土堆积过程中形成了不同堆积厚度的黄土分布，且不同的黄土分布厚度就会形成不同的沟谷侵蚀发育程度[9]。陇东地区黄土厚度的分布存在较大的空间差异，在陇东中部有4个区域的黄土厚度超过了200 m，其中最大的区域是董志塬。从整体上看，陇东地区中部的黄土厚度大，东西两侧厚度依次减薄，南部的黄土厚度大于北部（图8）。以c流域为例，总体上黄土厚度呈南西高北东低。将黄土厚度的空间分布与盒维数和边界维数空间分析得出的沟谷侵蚀程度空间分布进行对比，可发现黄土堆积厚的区域，沟谷侵蚀发育程度低，而黄土厚度薄的区域，沟谷侵蚀发育程度高，这表明沟谷发育程度与黄土厚度呈负相关。袁爽等[9]在研究中指出分别位于董志塬东西两侧的平凉市和旬邑县的黄土厚度远远小于董志塬的黄土厚度，而这2个地区的塬占比也远小于董志塬的塬占比；崔帅等[33]通过评价董志塬沟谷的发育特征，也发现黄土堆积越厚，其残塬占比越小，沟谷发育程度越低。这都与本文的观点互为佐证。结合以上发现，应该对陇东地区

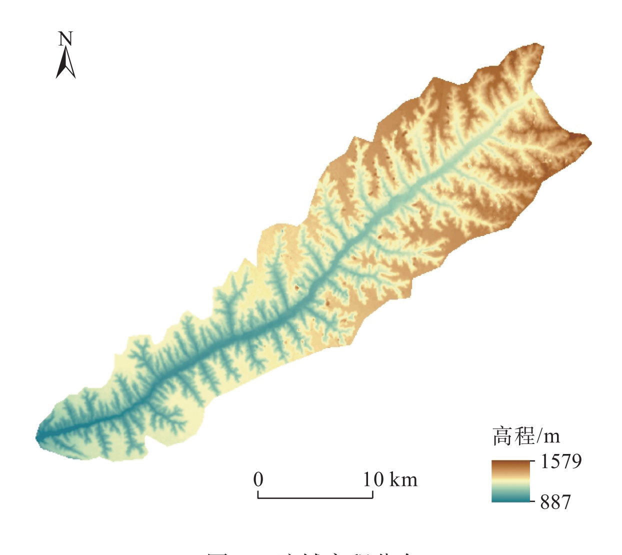


图7 c流域高程分布

Fig. 7 Elevation distribution of watershed c

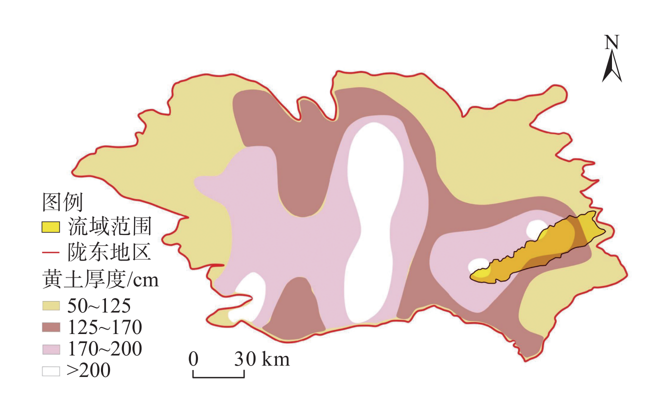


图8 陇东地区黄土厚度分布[9]

Fig. 8 Distribution of loess thickness in eastern Gansu Province[9]

北西和北东部的大片地区加大"固沟保塬"工程的投入,沟谷侵蚀在这些地区发生的启动条件相对较低。

3.3.3 区域地质构造 陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部,属于华北克拉通的次级构造单元。自中晚元古代以来,鄂尔多斯地台基本上保持稳定,主要表现为大型多回旋克拉通盆地,呈现出北高南低、东隆西降、隆坳相间的特征,地层产状平缓[34-35]。陇东地区横跨天环向斜和中央古隆起带,地质构造决定了地区的基本起伏状态和黄土堆积模式(图9)。构造运动对黄土地区沟谷侵蚀发育、土壤侵蚀等最为显著的影响主要表现在对地表面的整体抬升和下降导致的侵蚀基准面的变化,从而重力侵蚀和水力侵蚀共同作用形成的沟谷侵蚀空间条件得以发展,并在侵蚀作用下,形成了现在的沟谷侵蚀发育格局和侵蚀特征[35]。

不均匀的地表面抬升引起了陇东地区不同地区侵蚀基准面的不同变化,研究区北部侵蚀基准面较高,更易形成沟谷侵蚀下切,导致土壤侵蚀加剧,沟谷侵蚀发育程度较高,这就是形成现如今陇东地

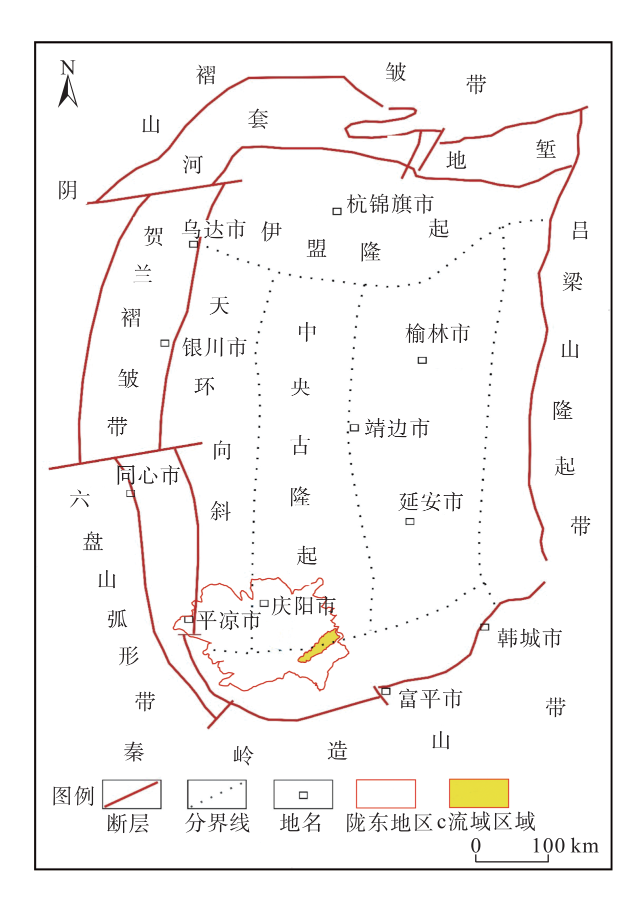


图9 陇东地区地质构造

Fig. 9 Tectonic of eastern Gansu Province

区不同地区不同侵蚀特征的内地质营力,也是影响各分区侵蚀特征的重要因素[36]。鄂尔多斯盆地的各种地质构造形成了黄土下伏古地形的不同分布格局,进而在黄土堆积过程中导致了黄土厚度分布的空间差异。不同的黄土厚度会导致不同程度的沟谷侵蚀发育[14]。黄土地区的地形地貌空间差异与下伏古地形的空间格局相关,陇东地区的下伏古地形呈现出东高西低、北高南低的分布格局,可能导致黄土堆积厚度的空间分布特征[3-4]。

此外,节理对于地貌的发育、形态等有密切关系。节理构成岩石的软弱面,提供了风化和侵蚀的有利条件,流水、冰、植物等常沿节理风化或侵蚀,造成各种地貌。如花岗岩中的纵节理、横节理和层节理,往往把坚硬的岩石切割成无数方块,在棱、角处先行风化,形成球状风化地貌。黄土地区土体发育黄土节理,其基岩也发育构造节理。在3.1.1节中,本文讨论了陇东沟谷网络分级和特征参数提取,研究发现陇东地区发育有3组近于正交的节理系统:N-S与E-W、ENE-WSW与NNW-SSE、NNE-SSW与WNW-ESE(图3),陇东地区沟谷水系的优势走向为N-S与E-W、NE-SW与NW-SE 3组近乎正交的沟谷水系走向(图4)。沟谷水系的优势走向与构造节理组发育方向几乎一致,这表明董志塬地区的沟谷发育与董志塬地区下伏古地貌及构造节理的发育存在高度系统性,其下伏古地貌造就了董志塬地区的地势特点以及侵蚀基准面的差异[3-4]。董志塬地区的构造发育控制着沟谷水系发育。因此,地质构造是影响陇东地区侵蚀特征的重要因素之一。

3.3.4 植被 基于ENVI软件的归一化植被指数(NDVI)提取c流域地区的植被分布(图10)。发现c流域植被的空间差异性较弱,南西部的植被比北东部的植被相对茂密,表现出一定的空间分布规律性。与土壤类型和性质相比,植被的覆盖程度影响着水入渗速度以及径流的形成与发育。植被可以减小雨滴对地面的击溅侵蚀能力,植被还可以暂时性的截留和吸收大部分雨水,对地表径流可形成一定的阻碍作用[37]。植被能够对土体起到加固和锚固的作用,增大土体的抗剪能力,抗侵蚀能力增强,使得沟谷不易被侵蚀。在盒维数和边界维数的空间分异分析中,c流域北东部的沟谷侵蚀发育程度高,而植被分布相对稀疏;c流域南西部的沟谷侵蚀发育程度低,而植被分布相对密集。沟谷发育程度

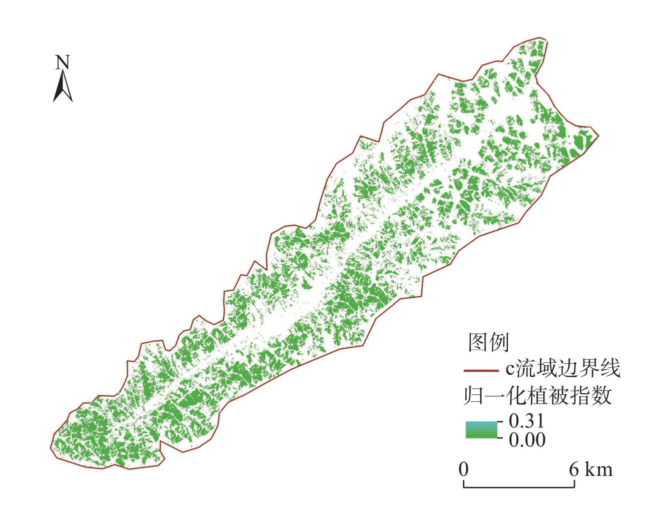


图10 c流域植被分布

Fig. 10 Vegetation distribution of watershed c

与植被两者在大体上呈负相关的关系。植被覆盖度在一定程度上决定了地表的裸露程度，是否存在大量植被的覆盖将会对沟谷发育程度产生影响。王崔林[27]及袁爽等[9]的研究中都存在相同观点。然而该地区植被的空间分异性较弱，这表明植被可能是影响该流域侵蚀特征的因素之一。鉴于流域内植被分布差异不大，建议增加北西部植被密度及多样性。

4 结 论

本文基于DEM和影像数据目视解译3条典型沟谷，提取沟谷网络并进行分级和特征参数计算，通过分析沟谷走向研究了沟谷发育模式及沟谷间的影响关系，基于盒维数和边界维数研究沟谷流域的发育和侵蚀空间分布规律。研究发现：

(1) 在80%的可置信区间下，a、b和c 3个流域的主沟与一级支沟、一级支沟与二级支沟的夹角存在统计学关联。在80%的显著概率下，主沟与一级支沟的夹角不小于57°、50°和50°；一级支沟与二级支沟的夹角不小于58°、58°和55°。55°可以作为沟谷发育夹角的极限值。

(2) 通过对黄土高原陇东地区的3条沟谷a、b、c进行盒维数计算可以发现：a流域的盒维数最大，b流域次之，c流域最小。盒维数是衡量沟谷发育的复杂程度的量化指标，沟谷的复杂程度从大到小的顺序是a、b、c。用边界维数来研究沟沿线的发育特征，可衡量沟沿线发育的复杂程度。3个流域的沟沿线复杂度是：b>a>c。

(3) 黄土地区沟谷的发育特征和发育规模受制于多种因素的影响。地质构造是影响着沟谷发育程度的主要因素之一；高程越高，黄土厚度越薄，植被越稀少，沟谷侵蚀发育程度越高。陇东地区的北西部和北东部是固沟保塬工程应该注意的重点区域。

参考文献(References)

[1] 马乃喜. 黄土地貌演化与土壤侵蚀关系的分析[J]. 水土保持通报, 1996(2): 6-10. [Ma Naixi. Relationship between loess geomorphic evolution and soil erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996(2): 6-10.]

[2] 马新中, 陆中臣, 金德生. 流域地貌系统的侵蚀演化与耗散结构[J]. 地理学报, 1993, 60(4): 367-376. [Ma Xinzhong, Lu Zhong chen, Jin Desheng. Evolution and pissipative structure in the drainage-geomorphic system[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 60(4): 367-376.]

[3] Xiong L Y, Tang G A, Li F Y, et al. Modeling the evolution of loess-covered landforms in the Loess Plateau of China using a DEM of underground bedrock surface[J]. Geomorphology, 2014, 209: 18-26.

[4] Xiong L Y, Ang G A, Strobl J, et al. Paleotopographic controls on loess deposition in the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(9): 1155-1168.

[5] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996(1): 1-9. [Jiang Zhongshan, Wang Zhiqiang, Liu Zhi. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996(1): 1-9.]

[6] 姚文波. 历史时期董志塬地貌演变过程及其成因[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009. [Yao Wenbo. Evolution process and causes of Dongzhiyuan geomorphology in historical period[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2009.]

[7] 肖晨超. 基于DEM的黄土地貌沟沿线特征研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2007. [Xiao Chenchao. Study on gully edge characteristics of Loess Landform based on DEM[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2007.]

[8] 龙毅, 周侗, 汤国安, 等. 典型黄土地貌类型区的地形复杂度分形研究[J]. 山地学报, 2007, 25(4): 385-392. [Long Yi, Zhou Tong, Tang Guo'an, et al. Research on terra in complexity of several typical regions of Loess Landform based on fractal method[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(4): 385-392.]

[9] 袁爽, 许强, 赵宽耀, 等. 陇东地区残塬分布规律及影响因素分析[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 63-69, 108. [Yuan Shuang, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Analysis on distribution law and influencing factors of residual tableland in east Gansu Province[J].

Yangtze River, 2019, 50(8): 63−69, 108.]

[10] 张丽萍, 马志正. 流域地貌演化的不同阶段沟壑密度与切割深度关系研究[J]. 地理研究, 1998, 17(3): 273−278. [Zhang Liping, Ma Zhizheng. The research on the relation between gully density and cutting depth in different drainage landform evolution periods [J]. Geographical Research, 1998, 17(3): 273−278.]

[11] 李军锋, 李天文, 陈正江, 等. 基于DEM的黄土高原丘陵沟壑区沟谷网络节点研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 386−391. [Li Junfeng, Li Tianwen, Chen Zhengjiang, et al. Research on channel network nodes based on DEM in hill and gully area of the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(3): 386−391.]

[12] 刘秉正, 吴发启. 黄土塬区沟谷侵蚀与发展[J]. 西北林学院学报, 1993(2): 7−15. [Liu Bingzheng, Wu Faqi. Gully erosion and its development on Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry College, 1993(2): 7−15.]

[13] 何雨, 贾铁飞, 李容全. 黄土丘陵区沟谷发育及其稳定性评价[J]. 干旱区地理, 1999, 22(2): 64−70. [He Yu, Jia Tiefei, Li Rongquan. Development of gullies and evaluation on their stability in the loess hill region[J]. Arid Land Geography, 1999, 22(2): 64−70.]

[14] 景可. 黄土高原的新构造运动对侵蚀影响的研究[J]. 水土保持通报, 1982(6): 10−14. [Jing Ke. Study on the influence of neotectonic movement on erosion in the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1982(6): 10−14.]

[15] 王辉, 王天明, 杨明博, 等. 基于航片的黄土高原丘陵沟壑区沟谷侵蚀定量监测[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 127−132. [Wang Hui, Wang Tianming, Yang Mingbo, et al. Quantitative monitoring of gully erosion in hilly-gully area of Loess Plateau based on aerial images[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1): 127−132.]

[16] 张婷. 基于DEM的流域沟谷网络尺度特征及尺度分解[D]. 南京: 南京师范大学, 2008. [Zhang Ting. Scale characteristics and decomposition of gully network in watershed based on DEM[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.]

[17] Beneda J. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system[J]. Journal of Hydrology, 2013(488): 48−54.

[18] 蔡凌雁, 汤国安, 熊礼阳, 等. 基于DEM的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 141−144, 329. [Cai Lingyan, Tang Guo'an, Xiong Liyang, et al. An analysis on fractal characteristics of typical landform patterns in northern Shaanxi Loess Plateau based on DEM[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(3): 141−144, 329.]

[19] 陶象武. 基于GIS的流域地貌形态分形空间变异特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. [Tao Xiangwu. A study on spatial variation characters of geomorphologic fractal in river watershed based on GIS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.]

[20] 苟娇娇, 王飞, 罗明良, 等. 基于DEM的黄土高原沟谷节点分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 109−114. [Gou Jiaojiao, Wang Fei, Luo Mingliang, et al. Fractal characteristics of channel junctions(CJs) based on DEM[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 109−114.]

[21] 崔灵周, 李占斌, 朱永清, 等. 流域地貌分形特征与侵蚀产沙定量耦合关系试验研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 1−4, 9. [Cui Lingzhou, Li Zhanbin, Zhu Yongqing, et al. Experimental study on quantitative coupling relationship between topographic fractal feature and sediment yield in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 1−4, 9.]

[22] 张建兴, 马孝义, 赵文举, 等. 黄土高原重点流域河网分形特征研究[J]. 泥沙研究, 2008(5): 9−14. [Zhang Jianxing, Ma Xiaoyi, Zhao Wenju, et al. Analysis on fractal characteristics of river networks of key watersheds in the Loess Plateau[J]. Journal of Sediment Research, 2008(5): 9−14.]

[23] 朱永清. 黄土高原典型流域地貌形态分形特征与空间尺度转换研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006. [Zhu Yongqing. Research on fractal characters of geomorphology and space-scale conversion in typical watershed on the Loess Plateau[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.]

[24] Qin Z L, Wang J X, Lu Y. Multifractal characteristics analysis based on slope distribution probability in the Yellow River Basin, China[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2021, 10 (5): 337, doi: 10.3390/ijgi10050337.

[25] Meng X M, Zhang P J, Li J, et al. The linkage between box-counting and geomorphic fractal dimensions in the fractal structure of river networks: The junction angle[J]. Hydrology Research, 2020, 51(6): 1397−1408.

[26] 马煜栋, 杨帅, 韩静, 等. 陕西榆林地区无定河流域淤地坝遥感解译[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 786−791. [Ma Yudong, Yang Shuai, Han Jing, et al. Remote sensing interpretation of check dams in Wuding River Basin in Yulin area of Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 786−791.]

[27] 王崔林. 黄土董志塬沟谷侵蚀发育空间分异特征及其综合治理模式研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [Wang Cuilin. Study on the gully spatial differentiation characteristics and comprehensive control mode of Dongzhiyuan area in the Loess Platea[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.]

[28] Kou P L, Xu Q, Yunus A P, et al. Landslide-controlled soil erosion rate in the largest tableland on the Loess Plateau, China[J]. Human Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26: 2478−2499.

[29] 袁爽, 许强, 赵宽耀, 等. 基于统计学的陇东地区沟谷分布及演化研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 172−180. [Yuan Shuang, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Gully distribution and evolution in east Gansu Province based on statistics[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 172−180.]

[30] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W. H. Freeman & Co, 1982.

[31] Krummel J R, Gardner R H, Sugihara G, et al. Landscape patterns in a disturbed environment[J]. Oikos, 1987, 48(3): 321−324.

[32] 姜琳, 王清晨, 王香增, 等. 鄂尔多斯盆地东南部中生界地层节理发育特征与古应力场[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1774−1790. [Jiang Lin, Wang Qingchen, Wang Xiangzeng, et al. Joint development and paleostress field in Mesozoic strata of the southeastern Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1774−1790.]

[33] 崔帅, 许强, 袁爽, 等. 基于组合熵权RSR法的董志塬沟谷发育评价[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 481−491. [Cui Shuai, Xu Qiang, Yuan Shuang, et al. Evaluation of Dongzhi Loess Plateau Gully development based on combined entropy weight Rank-Sum Ratio method[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 481−491.]

[34] 张岳桥, 廖昌珍. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 28−40. [Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos Basin[J]. Geology in China, 2006, 33(1): 28−40.]

[35] 张岳桥, 施炜, 廖昌珍, 等. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 639−647. [Zhang Yueqiao, Shi Wei, Liao Changzhen, et al. Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, north China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 639−647.]

[36] 赵卫东, 王淑琴, 田剑, 等. 基于势能信息熵的黄土小流域地貌演化特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 65−75. [Zhao Weidong, Wang Shuqin, Tian Jian, et al. Geomorphic evolution characteristics of small loess watersheds based on potential energy information entropy[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 65−75.]

[37] 程瑛, 宋兴宇, 付正旭, 等. 近60 a黄河上游流域不同强度降水及大气湿润指数变化的新特征[J]. 干旱区地理, 2024, 47(8): 1327−1337. [Cheng Ying, Song Xingyu, Fu Zhengxu, et al. New characteristics of various intensity precipitation and atmospheric humidity index in the upper reaches of the Yellow River in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(8): 1327−1337.]

Developmental characteristics and influencing factors of gullies based on fractal theory in eastern Gansu Province

TANG Yandong, ZANG Cuiping, YU Yunpeng, YU Qinglin

(School of Architectural Engineering, Sichuan Polytechnic University, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: The Loess Plateau, characterized by soil highly susceptible to erosion from flowing water, frequently experiences gully backward erosion, leading to reduced arable land and a series of geologic hazards. Using high-resolution remote sensing imagery and DEM, the gully network and its characteristic parameters were extracted to analyze the interaction relationships and development characteristics of gullies. The complexity of gully erosion and development was comprehensively evaluated through the box dimension of the watershed gully and the boundary dimension of the gully ridgeline. Additionally, the development process and spatial distribution patterns of erosion in the gully watershed were examined based on the box and boundary dimensions. The results demonstrated that: (1) In secondary-level valley development, there exists a 110° developable interval on one downstream side. (2) Watershed b exhibits the most complex erosion development, followed by watershed a, and then watershed c; along valley slopes, watershed b has the most intricate boundary dimension, followed by watershed a, and then watershed c. The degree of watershed gully erosion increases from southwest to northeast for watershed c. (3) Geological structure significantly influences the degree of gully development, with higher elevation, thinner loess thickness, sparser vegetation, and greater gully erosion. This study offers guiding recommendations for soil and water conservation management in eastern Gansu Province.

Key words: gully development; remote sensing interpretation; fractal theory; influencing factors; eastern Gansu Province